同行专家业内评价意见书编号: _20250858233

附件1 浙江工程师学院(浙江大学工程师学院) 同行专家业内评价意见书

学号: <u>22260064</u>

浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)制

2025年03月25日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护 、军工项目保密等内容,请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告,可另行附页或增 加页数,A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔,亲 笔签名或签字章,不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写,编号规则为:年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4 位+流水号3位,共11位。 一、个人申报

(一)基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》,结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准,举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

本人以七相感应电机为研究对象,重点研究了开路故障状态下计及绝缘可靠性的电机容错控制问题,选题紧密结合学科工程应用前沿,具有重要的实用价值和工程意义。本人已掌握了 坚实的理论基础和基本的工程技术及专业知识,具有独立科研工作能力。主要掌握以下专业 技术知识:

(1) 七相电机在缺相运行状态下的绕组温度快速预测。充分考虑由于热源不平衡带来的绕组间的传热,保证温度预测精度。

(2)基于七相电机绕组绝缘可靠性计算容错电流,增加基于可靠热点温度的电流约束条件,重构容错电流。

(3) 在转差频率式的转子磁场定向控制方法下,通过在不同的谐波平面注入参考电流,完成对计及绝缘可靠性的容错电流的控制。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

针对电机的绝缘结构优化,经过前期对平电极电场的分析调研,可以知道电机内最容易产生局部放电的位置是不平滑的尖点,同时板极距离得越近,电场强度越强。结合这款电机目前的绝缘结构,PI膜沿着线圈跑道裹了一圈,对于线圈和平直侧壁之间有较好的绝缘效果,但是在圆弧段线圈和冷板之间没有有效的阻隔,爬电距离短。因此,一种绝缘结构的优化方案就是在圆弧段加上一片翻折的PI膜,增加爬电距离,减小空隙的场强。对于这片PI膜要找到更优的翻折宽度和角度。对简化结构进行静电场的仿真,这是因为我们只关注这个间隙的电场膜最大值,也就是最容易产生局部放电乃至击穿的位置。终端电压加在线圈上,也就是整个线圈都是等势体;冷板接地。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

在Akribis公司的实践过程中,我围绕电机的绝缘系统优化及可靠运行控制这一课题,获得 了丰富的知识、技能以及专业素质的提升。这次实践经历不仅加深了我对电机绝缘系统的理 解,还培养了我在实际工程应用中的问题解决能力和创新思维。

首先,通过这次实践,我系统地学习了电机绝缘系统的基础知识以及相关的理论分析方法。 在学校的理论学习中,我们主要接触到电机原理和基础电磁场理论,但对绝缘系统的具体应 用和优化却了解不深。在实践过程中,我深入研究了电机绝缘结构的电势场分析,特别是局 部放电现象的成因及其影响。在实际项目中,通过对仿真结果的反复分析与实验验证,我对 电机绝缘结构的电场分布及其优化策略有了更为深刻的认识。例如,我了解到电场集中效应 是导致绝缘失效的主要原因之一,而通过增加绝缘膜的爬电距离,可以有效减弱局部电场强 度,从而减少局部放电的风险。

此外,通过与公司工程师的交流,我掌握了更多关于PI膜材料特性的知识,了解了不同材料 在绝缘结构中的应用效果以及其对电场分布的影响。这些知识不仅丰富了我对材料科学的理 解,也让我对电机设计中的材料选择有了更为全面的认识。

在实际工作中,我的多项能力得到了显著提升。首先是仿真分析能力的提升。通过此次项目,我学会了如何使用专业软件进行电场仿真,并能够通过调整模型参数来观察电场分布的变

化。这一过程不仅锻炼了我的建模能力,也提升了我对仿真结果的解读能力。针对不同绝缘 结构件进行电场仿真时,我需要不断调整PI膜的宽度和角度,并通过仿真结果确定最佳的绝 缘结构参数。这个过程中,我学会了如何根据仿真数据优化设计方案,并验证其可行性。

其次,我的实验操作能力也得到了显著提升。在项目的实验验证阶段,我参与了电机样件的 贴膜操作,并使用高压绝缘测试仪进行实验验证。这一过程让我更加熟悉了实验设备的使用 方法,以及如何设计和执行实验以验证仿真结果。通过对漏电流的观测,我能够更好地判断 绝缘结构的有效性,并提出改进建议。

在专业素质方面,这次实践培养了我的工程素养和团队合作精神。工程实践中,问题往往是 复杂且多变的,需要不断调整和优化设计方案。在这个过程中,我学会了如何面对挑战,保 持严谨和耐心,特别是在遇到仿真结果与实验结果不一致的情况下,我学会了从多个角度分 析问题并提出解决方案。此外,我在与团队成员的合作中,学会了如何有效沟通,如何在团 队中扮演好自己的角色,并协调团队内部的资源和任务, 以确保项目的顺利进行。 (二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利 证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1.

公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含 发明专利申请)、软件著 作权、标准、工法、著作 、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
Fault-Tolerant Control Strategy					
Considering the Insulation Reliability of Windings for Five- Phase Induction Motor	会议论文	2023年11 月15日	ICEMS2023	1/5	EI会议收 录
一种五相永磁同步电机 的容错控制方法及系统	授权发明专利	2023年08 月08日	专利号: ZL 2023 1 0500328.9	2/7	
开路故障状态下计及绝 缘可靠性的七相感应电 机容错控制策略	学位论文送审专家 评阅结果全优	2025年01 月20日		1/1	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自 主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方 案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效 益等】

(三)在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况					
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩: 88 分				
专业实践训练时间及考 核情况(具有三年及以上 工作经历的不作要求)	累计时间: 1 年 (要求1年及以上) 考核成绩: 83 分				
	本人承诺				
个人声明:本人」 ,特此声明!	上述所填资料均为真实有效,如有虚假,愿承担一切责任				
申报人签名:一卡本教					

二、日常新	二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果						
	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考虑评价:						
日常表现 考核评价	□ 优秀 □ 良好 □ 合格 □ 不合格 日本合格						
	德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字(公章): 2025年3月31日						
申报材料 审核公示	根据评审条件,工程师学院已对申报人员进行材料审核(学位课程成绩、专业 实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况),并将符合要求的申报材料 在学院网站公示不少于5个工作日,具体公示结果如下:						
中级公小	□通过 □不通过(具体原因:) 工程师学院教学管理办公室审核签字(公章): 年月日						

浙江大学研究生院

					/ / / / / /							
学号: 22260064	姓名: 林颖	性别: 女		学院	: 工程师	币学院		专业: 电气工程			学制: 2.5年	
毕业时最低应获: 26	. 0学分	已获得: 2	28.0学	分				入学年月: 2022-09	毕고	L 年月]:	
学位证书号:					毕业证	书号:			授于	学学位	Ì:	
学习时间	课程名称		备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义理论与	实践		2.0	91	专业学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	76	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	体育舞蹈			1.0	97	公共学位课	2022-2023学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	79	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿			1.5	84	专业学位课	2022-2023学年春夏学期	工程伦理		2.0	93	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿			1.5	87	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生论文写作指导		1.0	94	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	车辆信息传感与通信技术			3.0	87	专业选修课	2023-2024学年秋季学期	电动汽车和混合动力汽车系统		1.0	88	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	车辆控制理论与技术			3.0	90	专业学位课	2023-2024学年冬季学期	研究生英语应用能力提升		2.0	89	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践			3.0	84	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年春季学期	电气装备健康管理			2.0	92	专业选修课						
								ALL:	ts	5		

说明: 1.研究生课程按三种方法计分:百分制,两级制(通过、不通过),五级制(优、良、中、

及格、不及格)。

2. 备注中"*"表示重修课程。

学院成绩校核章: 成绩校核人:张梦依 打印日期:2025-03-20



Fault-Tolerant Control Strategy Considering the Insulation Reliability of Windings for Five-Phase Induction Motors

1st Ying Lin Polytechnic Institute Zhejiang University Hangzhou, China yinglin2080@zju.edu.cn

3rd Wen Liu Digital Manufacturing Research Institute Zhejiang Wanli University Ningbo, China davynjtu@126.com 1st Jian Zhang Polytechnic Institute Zhejiang University Hangzhou, China jian_zhang_zju@zju.edu.cn

4th Feng Leng* Wuhan Second Ship Design and Research Institute Wuhan, China lengfeng2014@qq.com

Abstract—Under fault-tolerant control strategies without considering the winding insulation aging, the insulation reliability will decrease due to excessive current. This paper establishes an optimum fault-tolerant control strategy with one phase open-circuit for five-phase induction motors, in which insulation reliability is considered. Firstly, the insulation reliability model under various temperatures is established based on accelerated degradation data. Meanwhile, the prediction model of remaining useful life for motor is obtained based on Bayes theory. Secondly, a temperature prediction model based on the three-node lumped parameter thermal network is established to predict the winding temperature in fault-tolerant modes. Therefore, an optimal fault-tolerant control model for five-phase induction motors is established and the reconfigured fault-tolerant current is calculated. Finally, under the hysteresis current control method, the motor will maintain a new fault-tolerant control state. This paper verifies that the fault-tolerant control strategy considering the insulation reliability of windings still ensures the running performance, and prolongs the motor service life.

Keywords—insulation reliability, five-phase induction motors, remaining useful life, temperature prediction, reconfigured faulttolerant current

I. INTRODUCTION

Compared to traditional three-phase motors, multi-phase motor is widely used in conditions with high reliability requirements for motors such as airplanes and warships, due to its features of high efficiency and reliability [1]-[3]. Researchers have proposed various fault-tolerant control methods for one phase open-circuit faults in electric motors, aiming at different targets, such as ensuring minimum copper loss method [4]-[6] or limiting post fault torque ripple [7]-[9]. These methods optimize the amplitude and phase of normal phase currents during the motor's phase-fault operation. By employing hysteresis current control, motor achieves faulttolerant and disturbance-free operation, leading to smooth torque output[10].

Under the influence of thermal stress, the motor's phasefault operation disrupts the temperature balance, leading to

*Corresponding author.

E-mail address: lengfeng2014@qq.com

This work was supported in part by the Ningbo science and technology innovation 2025 major project (20211ZDYF020218) and in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant 51977192 and 51827810.

excessive localized temperature rise in the windings [11]. Operating in a fault-tolerant mode without derating significantly increases the internal temperature rise, which can potentially result in thermal issues such as aging of winding insulation. This could shorten the winding lifespan, making it disadvantageous for fault motors that require reliable operation over a certain period [12]-[14].

In order to mitigate excessive thermal stress, the control methods proposed in [15] and [16] aim to maintain consistency in the maximum values of phase currents before and after the fault. However, these methods require the motor to operate at lower torque levels. On the other hand, the total losses of the windings were kept constant to compensate for the derating of motor in [17]. The above-mentioned studies primarily focus on limiting the internal temperature rise of the motor by constraining the currents within predefined thresholds, but they do not address the assessment of winding insulation reliability. It can be noted that comprehensive investigation regarding the motor's temperature rise, an important factor closely related to its reliability, remains limited.

To enhance the reliability and operational performance of FPIM (Five Phase Induction Motor) systems, it is essential to combine the aging characteristics of motor insulation materials and investigate insulation reliability based on the maximum temperature rise of the windings. Therefore, insulation reliability has to be fully considered for FPIM faulttolerant control.

II. INSULATION RELIABILITY MODEL

A. Accelerated degradation experiment for the winding insulation

Several motor winding insulation materials were selected as test samples for constant temperature stress accelerated degradation tests at different temperature stress levels. The PD (Partial Discharge) magnitude was used as the degradation test data and also as a characteristic of the RUL (Remaining Useful Life) of motor winding insulation. Let Q_{ijk} represent the PD quantity obtained from the *j*'th accelerated degradation test of the *i*'th test sample at the *k*'th temperature stress level. Let $\Delta Q_{ijk} = Q_{ijk} - Q_{i(j-1)k}$ represent the PD degradation increment of the *i*'th test sample at the *k*'th temperature stress level from the *j*'th to (j+1)'th test. $\Delta t_{ijk} = t_{ijk} - t_{(i-1)jk}$ represents the time increment, where i = 2, 3, ..., n, j = 1, 2, ..., m,

2nd Youtong Fang College of Electrical Engineering Zhejiang University Hangzhou, China youtong@zju.edu.cn

经检索 "Engineering Village",下述论文被《Ei Compendex》收录。(检索时间: 2024 年 5 月 27 日)。

<RECORD 1>

Accession number:20240315394449

Title:Fault-Tolerant Control Strategy Considering the Insulation Reliability of Windings for Five-Phase Induction Motors

Authors:Lin, Ying (1); Zhang, Jian (1); Fang, Youtong (2); Liu, Wen (3); Leng, Feng (4)

Author affiliation:(1) Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China; (2) Zhejiang University, College of Electrical Engineering, Hangzhou, China; (3) Digital Manufacturing Research Institute, Zhejiang Wanli University, Ningbo, China; (4) Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, China

Corresponding author:Leng, Feng(lengfeng2014@qq.com) Source title:2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2023

Abbreviated source title:Int. Conf. Electr. Mach. Syst., ICEMS

Part number:1 of 1

Issue title:2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2023 Issue date:2023

Publication year:2023

Pages:1772-1777

Language:English

ISBN-13:9798350317589

Document type:Conference article (CA)

Conference name: 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2023

Conference date:November 5, 2023 - November 8, 2023

Conference location: Zhuhai, China

Conference code:195497

Publisher:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Number of references:0

Main heading:Insulation

Controlled terms:Fault tolerance - Forecasting - Induction motors - Winding

Uncontrolled terms: 'current - Control strategies - Fault-tolerant - Faults tolerant controls - Five-phase induction motors - Insulation reliability - Prediction modelling - Reconfigured fault-tolerant current - Remaining useful lives - Temperature prediction

Classification code:413 Insulating Materials - 691.2 Materials Handling Methods - 705.3.1 AC Motors

DOI:10.1109/ICEMS59686.2023.10344765

Funding details: Number: 51827810,51977192, Acronym: NSFC, Sponsor: National Natural Science Foundation of China;Number: 20211ZDYF020218, Acronym: -, Sponsor: Science and Technology Innovation 2025 Major Project of Ningbo;

Funding text:*Corresponding author. E-mail address: lengfeng2014@qq.com This work was supported in part by the Ningbo science and technology innovation 2025 major project (20211ZDYF020218) and in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant 51977192 and 51827810.

Database:Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2024 Elsevier Inc.

注:

1. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。

2. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



证书号第6213729号





2023年08月08日

发明专利证书

发 明 名 称: 一种五相永磁同步电机的容错控制方法及系统

发明人:张健;林颖;黄晓艳;方攸同;王佳金;张钦;杨家强

专利号: ZL 2023 1 0500328.9

专利申请日: 2023年05月06日

专利权人:浙江大学

地 址: 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

授权公告日: 2023年08月08日 授权公告号: CN 116208063 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查,决定授予专利权,颁发发明专利证书 并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年,自申请日起 算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权 人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长 申长雨

即公布

第1页(共2页)

其他事项参见续页

证书号第6213729号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年05月06日前缴纳。 未按照规定缴纳年费的,专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

CIER DE

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下: 申请人:

浙江大学

发明人:

张健;林颖;黄晓艳;方攸同;王佳金;张钦;杨家强

第2页(共2页)

			· ··· •			
	一种五相永磁同步电机的容错控制方法及系统	林颖	是	第4章		() 2023-05-06
J3 (学位论文信息	0				
	论文信息录入状态:论文信息已录入		2.02			
			fyll曲北			
)4 (
	资 倍申 宣	Θ				
		in≇ »				
	4. 打印《浙汀大学硕士学位论文隐名评阅意见	书》				
	审查项目: 课	星成绩	读书报告	开题报告	预答辩	专业实践
		 ————————————————————————————————————		I	Ø ——	Ø
	审查结果:	甬过	通过	通过	通过	通过
	审查操作:	查看	查看	查看	查看	查看
	3. 打印《浙江大学硕士学位论文答辩申请报告	*>				
)5						
	论文评阅	\odot				
				V (1) T (4		
	▽豕灶名		计同时间	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□		计阅码来
	***			A (优秀)		同意答辩
	***			A (优秀)		同意答辩

分类号 :	TM346		单位	代码:	10335
密级:	无		学	号:	22260064



硕士学位论文

(专业学位)



 中文论文题目:
 开路故障状态下计及绝缘可靠性的

 七相感应电机容错控制策略

 英文论文题目:
 Fault-Tolerant Control Strategy Considering

 Insulation Reliability for Seven-Phase Induction

 Motors under Open- circuit Fault

专业学位类别、	领域:	电气工程	
研究方向:		电机与电器	
培养类型:		全日制非定向	
所在学院:		工程师学院	

论文提交日期: 二〇二五年三月

摘要

多相电机因其相数冗余的特性在开路故障状态下能维持电机容错运行状态,在新 能源汽车、军事舰船、航空航天等领域受到广泛关注。多相电机在开路故障状态下由于 绕组电流超过额定电流限值,绕组温升更加显著。传统的容错策略在设计过程中,或未 充分考虑温度对绕组绝缘寿命的影响,或未能动态评估容错运行状态下可靠性的变化, 因此尚无法满足在故障状态下实现长时间高可靠性运行的应用需求。对于绕组温升, 由于缺相运行状态下热源的不均匀分布与正常运行工况有别,预测绕组温升的热模型 简化过程有所不同。因此要提高多相电机容错状态下的可靠性主要涉及三个方面的研 究。一是缺相运行状态下多相电机温度场快速预测,二是评估多相电机绝缘材料在不 同温度下的绝缘可靠性,三是容错电流重构后的控制策略。

针对上述问题,本文进行了如下研究:

1) 针对在缺相运行状态下预测多相电机绕组温度未考虑相间传热的问题,本文以 七相感应电机为例,首先基于全绕组节点的 LPTN 使用顺序二次规划法对关键热参数 进行校正,去除贡献低的热阻和保留重要的绕组节点后串并联得到 8 节点 LPTN,在此 基础上得到定子绕组温度简化计算模型,通过正常运行状态和缺相运行状态的温升试 验数据对温度预测模型进行验证。

2)针对传统的容错电流计算方法未考虑过高的温升会降低绕组绝缘寿命的问题,本文建立了基于七相感应电机绕组绝缘可靠性的容错电流计算模型。首先通过绕组绝缘材料的加速老化试验,基于维纳过程的热老化模型,分析绝缘可靠寿命,找到影响绕组可靠性的薄弱环节;通过定子绕组磁动势推导,在故障前后磁动势不变的原则上,增加基于可靠热点温度的电流约束,求解开路故障状态下的容错电流;通过热网络和外推可靠性曲线仿真对比验证了所提方法的有效性。

3) 最后,在容错电流重构的基础上,建立了转差频率式的转子磁场定向控制模型, 实现计及绝缘可靠性的容错电流控制。建立七相感应电机的数学模型,获得在基波和 不同谐波子空间上的电机变量,明确矢量控制关系;通过容错电流在不同子空间上的 解耦变换,得到在不同子空间上的谐波参考电流系数,进而参与到转子磁场定向的环 路控制;最后通过加载试验,验证所提策略的稳态性能和动态响应,且在额定转矩和转 矩过载工况下与传统方法进行对比,分析绝缘可靠性方法的优势。

关键词:多相电机;绝缘寿命;绕组温升;容错电流计算;可靠热点温度

V

ABSTRACT

Multiphase motors can maintain fault-tolerant operation under open-circuit faults because of their redundant phase design. As a result, they have attracted attention in new energy vehicles, military ships, and aerospace applications. Under open-circuit conditions, however, the winding current often exceeds its rated limit, causing a more pronounced temperature rise. Traditional fault-tolerant strategies either do not fully account for the impact of temperature on insulation lifetime or cannot dynamically evaluate reliability changes under fault-tolerant operation. Hence, they cannot satisfy the need for long-duration, high-reliability operation in faulty conditions. In addition, predicting winding temperature under open-circuit faults differs from normal conditions because the heat sources are distributed unevenly. To improve the reliability of multiphase motors in fault-tolerant states, three main areas need attention: (1) rapid prediction of the temperature field under open-circuit operation, (2) evaluation of insulation reliability at different temperature levels, and (3) design of a control strategy based on reconstructed fault-tolerant currents.

To address these issues, this paper conducts the following work:

(1) Rapid winding temperature prediction under open-circuit operation. Taking a sevenphase induction motor as an example, we first create a Lumped Parameter Thermal Network (LPTN) that includes all winding nodes. We use a sequential quadratic programming method to calibrate key thermal parameters. After removing low-contribution thermal resistances and retaining important winding nodes in series and parallel connections, we obtain an eight-node LPTN. Based on this model, we propose a simplified method for computing stator winding temperature. Experimental data from normal and open-circuit fault conditions confirm the accuracy of this prediction model.

(2) Fault-tolerant current calculation considering insulation reliability. Traditional faulttolerant current calculations often ignore how excessive temperature reduces winding insulation life. Therefore, we establish a fault-tolerant current calculation model that accounts for the insulation reliability of a seven-phase induction motor. First, we perform accelerated aging tests on the winding insulation material and build a thermal aging model based on a Wiener process to analyze its reliable lifetime. This helps identify the weak links in winding reliability. Next, we keep the stator magnetomotive force (MMF) the same before and after the fault and introduce a new current constraint based on hot-spot temperature. This lets us solve for the fault-tolerant current under open-circuit conditions. Finally, simulations combining the thermal network with extrapolated reliability curves validate the effectiveness of the proposed approach.

(3) Slip-frequency rotor field-oriented control with reconstructed fault-tolerant currents. Using the reconstructed fault-tolerant current as a basis, we develop a slip-frequency rotor field-oriented control model that takes insulation reliability into account. We establish the mathematical model of a seven-phase induction motor and derive its variables in both the fundamental and harmonic subspaces. By decoupling the fault-tolerant current across different subspaces, we obtain reference current coefficients for each subspace and incorporate them into the rotor field-oriented control loop. Load tests verify the steady-state performance and dynamic response of this strategy. We also compare it with conventional methods under rated torque overload conditions to show the benefits of considering insulation reliability.

KEY WORDS: Multiphase Motor; Insulation Lifetime; Winding Temperature Rise; Fault-Tolerant Current Calculation; Reliable Hotspot Temperature

目	录
\square	2

致	谢	IV
摘	要	V
AB	ST	RACTVI
目	录	VIII
图	目	录XI
表	目	录XIII
1	生论	- -
1 -	11	I 研究北县乃吾义
	1.1	· 列九月泉又忌入
	1.2	国内外研充现机
		1.2.1 多相电机谷错控制束哈研充现机
		1.2.2 多相电机研相运行温度场伏迷顶测力法研究现代
	1.2	1.2.3 多相电机统组绝缘可靠性顶测研免现状
•	1.3	
2 -	七相	感应电机在缺相运行状态下的绕组温度快速预测模型1]
	2.1	引言11
	2.2	基于全绕组组节点的七相电机 LPTN11
		2.2.1 电机尺寸及简化建模11
		2.2.2 热阻计算16
		2.2.3 热源分布17
	2.3	基于顺序二次规划的关键热参数校正18
	2.4	基于8节点的七相电机简化建模20
		2.4.1 基于 8 节点的 LPTN
		2.4.2 定子绕组快速温度预测模型22
	2.5	稳态温升试验验证
		2.5.1 七相感应电机试验平台
		2.5.2 正常运行状态的稳态温升结果25

	2.5.3 缺相运行状态的稳态温升结果	
2	2.6 本章小结	
3 基	于七相感应电机绕组绝缘可靠性的容错电流计算模型	29
3	3.1 引言	
3	3.2 绕组绝缘材料的加速热老化试验	
	3.2.1 缺相运行老化应力分析	
	3.2.2 热老化试验设计	30
	3.2.3 热老化试验结果	
3	3.3 基于维纳过程的热老化模型	
	3.3.1 性能老化建模	
	3.3.2 加速老化建模	
	3.3.3 模型参数估计	
3	3.4 基于绝缘寿命的可靠性模型	40
3	3.5 七相感应电机的定子绕组磁动势推导	
	3.5.1 绕组函数理论分析	
	3.5.2 合成时空磁动势分析	45
3	3.6 磁动势不变原则的容错电流重构	46
	3.6.1 故障前后磁动势不变的原则	46
	3.6.2 基于可靠热点温度的电流约束条件	47
	3.6.3 开路故障状态的容错电流重构	49
3	3.7 本章小结	52
4 七	相感应电机计及绝缘可靠性的容错控制策略	53
4	4.1 引言	53
4	4.2 七相感应电机的数学模型	53
	4.2.1 自然坐标系下的数学模型	53
	4.2.2 同步旋转坐标系下的数学模型	55
4	4.3 单相开路故障的矢量变换控制系统	57
	4.3.1 矢量控制方程	57
	4.3.2 转子磁场定向的矢量控制系统	59

		4.3.3 容错电流矢量的解耦控制	60
	4.4	容错控制实验验证	61
		4.4.1 计及绝缘可靠性方法的动态性能	61
		4.4.2 额定转矩工况下与传统策略的对比	
		4.4.3 转矩过载工况下与传统策略的对比	67
	4.5	本章小结	69
5	总结	与展望	
	5.1	全文总结	70
	5.2	展望	71
参	考文	献	72
攻	读硕	〔士学位期间研究成果	

图目录

图	1-1 论文主体框架	. 10
图	2-1 七相感应电机实物图	. 11
图	2-2 七相电机数学模型横截面图	. 12
图	2-3 七相电机四分之一横截面温度节点示意图	. 13
图	2-4 七相电机轴向截面温度节点示意图	. 14
图	2-5 七相电机集总参数热网络模型	. 15
图	2-6 平行板传热等效模型	. 16
图	2-7 空心圆筒形传热等效模型	. 16
图	2-8 顺序二次规划算法流程图	. 19
图	2-9 基于8节点的集总参数热网络模型	. 21
图	2-10 测试平台主要结构框图	. 23
图	2-11 测试平台部分实物图	. 24
图	2-12 各相绕组温度传感器位置图	. 24
图	2-13 实际测量值与8节点简化模型预测值在不同运行工况下的相对误差	. 27
图	3-1 加速热老化试验流程及试验平台	. 31
图	3-2 不同温度应力下的样品 $\tan \delta$ 退化量的均值和标准差	. 33
图	3-3 不同温度应力下的主绝缘模型参数估计值拟合结果及 95%置信区间	. 39
图	3-4 不同温度应力下的匝间绝缘模型参数估计值拟合结果及 95%置信区间	. 39
图	3-5 在 To 应力水平下主绝缘的概率密度函数和可靠性函数曲线	. 41
图	3-6 在 To 应力水平下匝间绝缘的概率密度函数和可靠性函数曲线	. 41
图	3-7 两种绝缘材料的温变 B10 寿命	. 42
图	3-8 a 相绕组函数的空间分布	. 43
图	3-9 a 相电流波形	. 44
图	3-10 a 相开路故障前后各相电流的相位图	. 47
图	3-11 热点温度与时间和可靠性之间的关系	. 48
图	3-12 重构容错电流的流程图	. 49
图	4-1 转子磁链定向角在空间坐标系中的表示	. 59

图	4-2 基于转子磁场定向的七相感应电机容错控制框图	. 60
图	4-3 计及绝缘可靠性方法的动态响应曲线	. 62
图	4-4 a 相开路故障状态下三种容错策略的电流波形	. 64
图	4-5 a 相开路故障状态下三种容错策略的稳态转矩曲线	. 65
图	4-6 a 相开路故障状态下三种容错策略的绕组温升曲线	. 66
图	4-7 随着转矩过载倍数增加,三种策略预测和实测的热点温度对比	. 67
图	4-8 计及绝缘可靠性的方法相较于两种传统方法的 B10 寿命提升百分比	. 68

表目录

表	2-1	电机的尺寸参数
表	2-2	简化 8 节点集总参数热网络的热阻
表	2-3	全绕组节点校正参数
表	2-4	不同工况下,实测和预测的绕组最大温升对比
表	2-5	缺相运行状态的各相电流稳态温度的实测值和预测值
表	3-1	不同温度应力下加速热老化模型的估计参数
表	3-2	加速热老化模型的待定系数估计值40
表	3-3	不同故障模式下本文所提策略与传统策略的仿真结果比较
表	4-1	单相开路故障状态下三种策略的参考电流系数63

1 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,全球运输工业正处于重大转型的关键时期,新能源技术的发展成为了应 对环境问题和能源危机的主要路径之一。在这一背景下,驱动电机作为新能源产业的 核心技术之一,其性能直接影响产品的能效、动力表现和市场竞争力^[1]。因此,研究并 开发高效又安全的电机驱动技术,已成为学术界和工业界的共同关注点。例如,随着材 料科学和电力电子技术的不断进步,驱动电机在新能源汽车中的应用取得了显著进展 ^[2]。尽管电机驱动技术在近年来取得了显著进展,在其发展过程中仍然面临着高效散热 问题和电磁干扰问题等诸多挑战^{[3][4][5]}。

与传统的三相电机相比,多相电机在新能源汽车,风力发电,航空航天等领域上的 应用具有以下诸多优点^{[6][7]},为突破现有技术瓶颈提供了新的解决思路:

(1)多相电机能够更好地利用电机中的空间,使得电机在同等体积下输出更高的 功率^[8]。此外,多相电机能够更均匀地分配电流,从而减少铜损和铁损,提高系统效率。

(2)多相驱动系统能够降低谐波含量,进而减少电机运转时产生的电磁噪声和机械振动。这有助于提高驾驶的舒适性,并降低车辆的噪声水平。

(3)相数冗余带来的系统高可靠性^[9]。即便在定子绕组出现故障时,也能通过减少负荷而无需停机继续运作;通过应用先进的容错控制技术和方法,确保电机在出现问题的情况下也能保持较长时间的稳定运行。此外,多自由度的设计提供了多平面特性,使得该系统比传统三相系统能够实现更多样化和灵活的控制选项,得以更精细的调整电机性能。

多相驱动电机的这些优势能显著降低对电机有高可靠性需求的应用的运行风险。 常见的运行风险来自定子绕组和驱动电路逆变器,它们都存在开路或者短路的情况。 当由于绕组短路,或逆变器晶闸管短路故障时,我们可以采用硬件故障隔离的方式,将 此类故障等效为多相电机缺相运行,也就是开路故障^[10]。多相电机定子绕组发生开路 故障时,会导致系统运行的不对称,产生较大的转矩脉动,严重干扰多相电机的稳定运 行。研究多相电机在开路故障下的容错控制策略,旨在不改变硬件结构的情况下合理 调整相电流^[11],确保多相电机在故障状态下仍能保持一定的输出能力,实现稳定运行

1

浙江省专业学位研究生优秀实践成果 证书



为表彰2023年浙江省专业学位研究生优秀 实践成果奖获得者,特发此证,以资鼓励。

成果名称: 计及绝缘可靠性的多相电机容错控制 策略

成果形式:实践报告类

专业学位类别:能源动力

获奖单位:浙江大学

获奖人员:林颖

指导教师:张健、印欣

证书编号: SYXSJCG2023111

浙江省研究生教育学会 二〇二四年十二月

DANO DANO DANO D